<大学の研究・動向>ブロックの積み替えに関する最適化問題を解く

AUTHOR(S):

土居, 伸二; 田中, 俊二; 木村, 真之

CITATION:

土居, 伸二 ...[et al]. <大学の研究・動向>ブロックの積み替えに関する最適化問題を解く. Cue 2020, 43: 3-8

ISSUE DATE:

2020-03

URL:

https://doi.org/10.14989/251242

大学の研究・動向

ブロックの積み替えに関する最適化問題を解く

工学研究科　電気工学専攻　生体医工学講座　複合システム論分野
教授　土　居　伸　二
准教授（国際高等教育院）　田　中　俊　二
特定講師（国際高等教育院）　木　村　真　之

1. はじめに

当研究室では、生体システムや多自由度共振振動システム・生産物流システムなどの複雑なシステムを扱っています。そして、これらシステムの振る舞いを非線形解析・最適化・シミュレーション技術により明らかにするとともに、望ましい挙動を達成するための研究を行っています。本稿では、生産物流システムにおけるブロックの積み替えの最適化について、当研究室の最近の成果を紹介します。

2. 研究の背景

コンテナヤードや物流倉庫でコンテナなどの荷物を保管する際は、利用可能なスペースの制約や取り出す際の移動距離を考慮して、荷物を何層にも積み重ねるのが一般的です。しかし、下層の荷物を取り出すには、その上に積まれた荷物を別の場所に積み替えなければなりません。このような荷物の積み替えに関する研究は、港湾のコンテナヤードにおけるコンテナを主な対象として、近年数多く行われています [1]。そこで、以下ではコンテナヤードを例に、この問題をもう少し詳しく説明します。

2.1　ブロック積み替え問題・整列問題

コンテナ物流のネットワークにおいて、港湾のコンテナターミナルは海運と陸運、あるいは海運同士を接続する重要な役割を担っています。コンテナ船やコンテナトラックによってコンテナターミナルに運び込まれたコンテナは、コンテナヤードで一時的に保管され、その後再びコンテナ船・コンテナトラックによって運び出されていきます。コンテナヤードでは、先述のようにコンテナを積み上げて保管します。したがって、運び出すことができるのは一番上に積まれたコンテナのみです。しかし、たとえば海上輸送の場合、目的地や重量・内容物など応じた順序でコンテナ船に積み込む必要があるので、コンテナを運び出す順序は積み上げられた順序と一致しません。そこで、コンテナの積み替えが必要となるわけです。コンテナの移動には、図１のようなトランスファークレーン（ガントリークレーン）が用いられます。クレーン本体には車

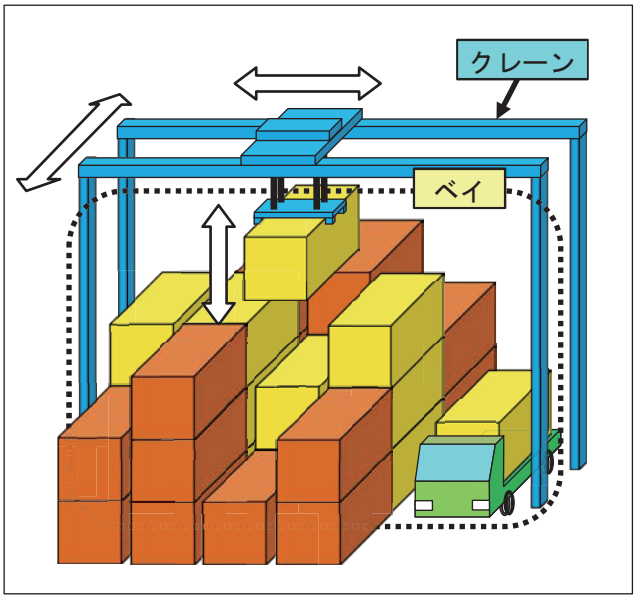

図 1: コンテナヤードにおけるコンテナとクレーン

輪が付いており、図中の手前および奥行方向に移動可能ですが、安全上の理由からコンテナを吊り下げたままの移動は通常行われません。したがって、コンテナは図中のベイ内で別のコンテナの上に積み替えることになります。その際、次に運び出したいコンテナの上に積み替えてしまうと、再びそのコンテナを積み替えなければなりません。つまり、コンテナをどのように積み替えるかによって、その後に必要となる積み替え回数が変化するわけです。もし積み替え先を注意深く選んで不要な積み替えをうまく減らすことができれば、コンテナヤードにおける作業効率が向上し、コンテナターミナルのスループット、さらにはコンテナ物流システム全体への波及効果が期待されます。このような考え方に基づいて研究されているのが、コンテナ積み替え問題（container relocation problem; CRP）、あるいはブロック積み替え問題（block relocation problem; BRP）と呼ばれる問題です。この問題は、ベイ内のすべてのコンテナを決められた順序で運び出すものとして、その際に必要となる積み替えの手間（おもに積み替え回数）を最小化する最適化問題です。

これらの問題は、コンテナを運び出す順序が事前にわからない、すなわち実際にコンテナを運び出す時点ではじめて明らかになることを前提としています。しかし、もし運び出し順序が事前にわかっているなら、コンテナをうまく積み直しておくことで、コンテナを運び出す際には積み替えなしに運び出すことができると考えられます。実際のコンテナターミナルでも、コンテナの運び込み・運び出しの空き時間にこのような作業が行われています（marshalling、あるいは housekeeping などと呼ばれます）。そこで、積み替えなしに運び出すことのできる配置へコンテナを積み直すものとして、その際に必要となる積み替えの手間を最小化する問題であるコンテナ整列問題（container pre-marshalling problem; CPMP）・ブロック整列問題（block pre-marshalling problem; BPMP）も研究されています。

2.2　関連する問題

2.1 節のコンテナに関する問題と同様の問題は、鉄鋼生産においても研究されています。連続鋳造工程で生産された板状の鉄の塊（スラブ）は、その後の熱圧延工程に送られる前にスラブヤードと呼ばれる場所で一時的に待機します。その際、スラブを積み重ねて保管するため、望ましい種類のスラブを取り出すには、やはり積み替えを考慮する必要があります。ただし、slab reshuffling problem、slab rehandling problem などと呼ばれるスラブを対象とした問題では、積み替えの扱いが少し異なります。

鉄道車両についても類似の問題が生じます。具体的には、列車の編成を留置線や車両基地で変更したり、車両基地から車両を送り出して望ましい順序で列車を編成したりする問題が研究されています（train shunting problem）。この問題は、車両をコンテナやスラブと見立てれば、上述の問題と同様に扱うことができます。

ここでは紹介しませんが、他にも類似の問題が様々な分野で研究されていることから、このような積み替えに関する問題は一般性の高い問題といえるでしょう。

3.　ブロック積み替え問題に対する研究

ここでは、ブロック積み替え問題に関する取り組みを紹介します。そのために、ブロック積み替え問題の基本的な設定について説明します。

3.1　問題設定

図 2 のように、ベイ内に同じ大きさのブロック（コンテナ）が積まれているものとします。ブロック縦 1 列分をスタックと呼びます。各スタックに置くことのできるブロック数には（クレーンの高さにより）制限があり、この例では最大 4 個置くことができます。各ブロックには運び出しの優先順位が与えられていて、この番号の小さいものから順にすべてのブロックをベイから運び出します。しかし、動か

すことができるのは一番上に積まれたブロックのみですので、下層のブロックを取り出す際には、その上に積まれたブロックを別のスタックへ積み替える必要があります。したがって、以下の二通りの操作を適用することになります。

積み替え：スタックの一番上に積まれたブロックを、空きのある別のスタックの一番上に移動させる

取り出し：運び出したいブロックがスタックの一番上に積まれているとき、ベイから取り除く

ブロック積み替え問題の目的は、最少の操作回数ですべてのブロックを運び出すことです。しかし、取り出し操作の回数はブロック数に一致しますので、実際には積み替え回数を最小化すれば十分です。

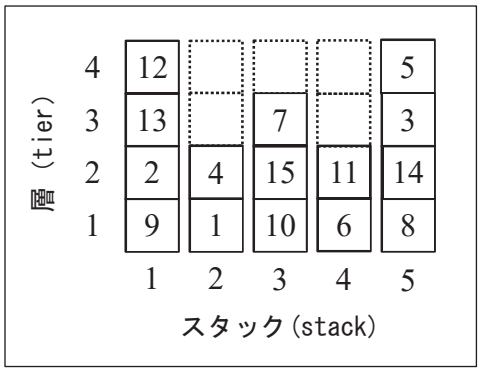

図 2: ベイ内のブロック（コンテナ）の取り出し順序

ブロック積み替え問題は、積み替え可能なブロックに着目すると、次のように分類できます。

（1）無制限問題

一番上に積まれたブロックはいずれも積み替え可能な問題

（2）制限付き問題

次に取り出したいブロックの一番上に積まれたブロックのみ積み替え可能である問題

また、取り出し優先順位に関する分類も可能です。

（a）優先順位に重複のない問題

ブロックの取り出し順序は一意である問題

（b）優先順位に重複のある問題

同じ優先順位のブロック間の取り出し順序に任意性のある問題

図 2 の例は（a）優先順位に重複のない問題であり、（1）無制限問題を考えた場合、一番上に積まれたブロック 12, 4, 7, 11, 5 のいずれも積み替えることができますが、（2）制限付き問題では、次に取り出すのはブロック 1 なので、その一番上に積まれたブロック 4 しか積み替えることができません。

3.2 ブロック積み替え問題に対する解法の研究

ブロック積み替え問題は一般に NP 困難であることが知られています。このため、ブロック数が多くなると最適な解を求めるのは難しくなると考えられますが、工夫次第ではブロック数が数十程度の現実的な規模の問題でも短時間で解くことができます。そこで当研究室では、ブロック積み替え問題の最適解を高速に求める厳密解法の研究を行っています。まず、制限付き問題（2)-(a）および（2)-(b）に対し、ブロックの積み替え先を順次列挙して探索するという、分枝限定法に基づく厳密解法を構築しました [2]。この解法では、積み替え回数の見積もり（下界値）精度を向上することで、分枝限定法における探索領域を限定し高速化をはかっています。たとえば図 2 のブロック配置を考えると、下層により早く運び出さなければならないブロック（番号の小さいブロック）が積まれているブロック 12, 13, 4, 15, 11, 5, 14 は、必ず 1 回は積み替えなければなりません。したがって、最少でも 7 回の積み替えが必要ですが、下界値の計算方法を工夫すると、8 回の積み替えが必要であることがわかります（最適解も 8 回）。このように下界値を改善することで、分枝限定法における限定操作が効きやすくなり、探索効率が向上します。つぎに、優先順位に重複のない無制限問題（1)-(a）に対して、同様に分枝限定法に基づく解法を構成しました [3]。ここでは、無制限問題における積み替え回数の下界値を計算する方法、および分枝限定法における無駄な探索の回避方法を提案しています。後者について図 2 を例にもう少し詳しく説明すると、たとえばブロック 4 をスタック 2 からスタック 3 へ積み替え、その直後にスタック 4 へ積み替えた場合と、

スタック 2 からスタック 4 へ直接積み替えた場合は、結果として同じブロック配置になります。しかし、直接積み替えた方が積み替え回数は少なくてすむので、2 回に分けて積み替える解を考えるのは意味がありません。このような解を検出する簡便なルールを分枝限定法に組み込んで、無駄な探索を回避しています。この考え方は、優先順位に重複のない制限付き問題（2)-(a）に対しても効果があるため、文献 [3] では文献 [2] の解法の改善も行いました。

これらの解法により、ブロック数が 50 程度までのブロック積み替え問題は効率的に解けるようになりました。現在、優先順位に重複のない制限付き問題（2)-(a）に対して、ブロック数が 100 程度の問題も解ける解法を構築し、発表準備を進めているところです。

3.3　クレーンによる移動を考慮したブロック積み替え問題

積み替え回数の最小化を目的としたブロック積み替え問題だけでなく、クレーンによるブロックの移動距離を考慮し、作業時間を最小化する問題も研究しています。ここでは、優先順位に重複のない制限付き問題（2)-(a）を対象としています。まず、図 3 の（A）に示すような、ブロックを移動させる際には必ず一番上までブロックを持ち上げてから水平移動させる、という設定のもとで解法を提案しました [4]。つづいて、より現実的なクレーンの動作を想定して、図 3 の（B）のように他のブロックと衝突しない高さだけ持ち上げるという設定のもとで解法を構成しました [5]。

3.4　積み込み計画を考慮したブロック積み替え問題

コンテヤードと同様、コンテナ船の船内でもコンテナを積み上げることになりますので、コンテナを積み込む順序を考える必要があります。そこで、コンテナ船への積み込み計画を考慮したブロック積み替え問題の研究も行っています。図 4 において､ブロックの記号はコンテナ船のどのスタック（A ～ E）の何層目に積み込むのかを表しています。この問題の目的は、コンテナヤード内での積み替えのみが許されるものとして、最少の積み替え回数ですべてのブロックをコンテナ船に積み込むことです。この例では、ブロック D2 を（コンテナヤード内で）積み替えることにより、ブロック E1, B1 をコンテナ船に積み込むことができるようになります。さら

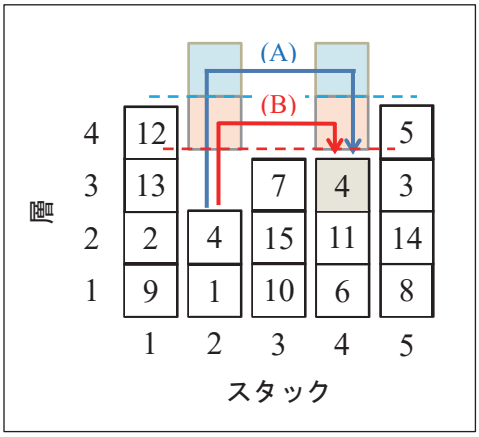

図 3: 積み替えにおけるクレーンの移動距離

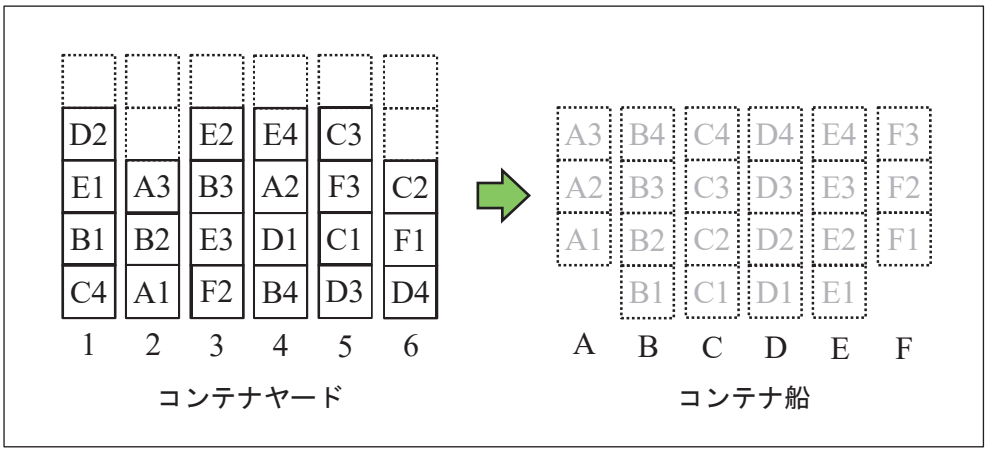

図 4: 積み込み計画を考慮したブロック積み替え問題

に、ブロック E2 も積み込み可能となります。この問題に対しては、近似解法 [6] および厳密解法 [7] を提案しました。

4. ブロック整列問題

ブロック整列問題では、ブロック積み替え問題とは異なり、ブロックの取り出し操作は行わずにベイ内での積み替え操作のみでブロックを並べ替えます。上層から下層へと運び出し順にブロックを積み直せば、将来運び出す際に積み替えが発生しません。そこで、ブロック整列問題では、最少の積み替え回数でそのような配置にブロックを積み直すことを目指します。ブロック整列問題も NP 困難であることが知られています。

ブロック整列問題の場合、取り出し優先順位の重複の有無による分類は行われておらず、一般に重複があるものとして扱うことになります。また、明らかに積み替えが必要なブロックについても、ブロック積み替え問題とは考え方が異なります。ブロック積み替え問題の場合、下層により早く運び出さなければならないブロックが積まれているブロックは、少なくとも 1 回積み替えなければなりませんでしたが、一方、ブロック整列問題の場合、各スタックを下層から見ていき、運び出し順序に並んでいないブロックが見つかれば、そこから上層のブロックはすべて、少なくとも 1 回積み替えなければなりません。図 2 の例では、ブロック 13, 12, 4, 15, 7, 11, 14, 3, 5 はすべて積み替え対象です。もちろん、これ以外のブロックを積み替えなければならない場合もあります。

このブロック整列問題に対しても、分枝限定法における下界値を工夫することで、効率のよい厳密解法 [8, 9] を提案しています。

5. おわりに

本稿では、コンテナやスラブなどの積み替えを対象とした研究の取り組みを紹介しました。ここで紹介した問題は、実用上の重要性もさることながら、パズルを解くような面白さがあります。その面白さを体験できるよう、web ブラウザ上で実行可能なデモ [10] も公開していますので、そちらも参照ください。今後は、解法を高速化すると同時に、より一般的な幅広い問題へと拡張していきたいと考えています。

参考文献

[1] 田中 : 荷物の積み替え作業低減化に関する研究動向 , システム / 制御 / 情報 , Vol. 61, No. 3, pp. 88–94（2017）

[2] S. Tanaka and K. Takii: A faster branch-and-bound algorithm for the block relocation problem, IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, vol. 13, pp. 181–190（2016）

[3] S. Tanaka and F. Mizuno: An exact algorithm for the unrestricted block relocation problem, Computers & Operations Research, vol. 95, pp. 12–31（2018）

[4] Y. Inaoka and S. Tanaka: A branch-and-bound algorithm for the block relocation problem to minimize total crane operation time, Proceedings of the 19th International Conference on Harbor, Maritime and Multimodal Logistics Modelling and Simulation（HMS 2017）, pp. 98–104（2017）

[5] Y. Inaoka and S. Tanaka: The block relocation problem under a realistic model of crane trajectories, Proceedings of the 20th international conference on Harbor, Maritime & Multimodal Logistics Modelling and Simulation, pp. 62–66（2018）

[6] R. Jovanovic, S. Tanaka, T. Nishi, and S. Voß: A GRASP approach for solving the Blocks Relocation Problem with Stowage Plan, Flexible Services and Manufacturing Journal. vol. 31, pp. 702–729（2019）

[7] S. Tanaka and S. Voß: An exact algorithm for the block relocation problem with a stowage plan, European Journal of Operational Research, vol. 279, pp. 767–781（2019）
[8] S. Tanaka and K. Tierney: Solving real-world sized container pre-marshalling problems with an iterative deepening branch-and-bound algorithm, European Journal of Operational Research, vol. 264, pp. 165–180（2018）
[9] S. Tanaka et al.: A branch and bound approach for large pre-marshalling problems, European Journal of Operational Research, vol. 278, pp. 211–225（2019）
[10] http://turbine.kuee.kyoto-u.ac.jp/~tanaka/games/